

КУЧИН А.С.,

Российский Университет Дружбы Народов, г. Москва, Россия, e-mail: alex.ku4in@yandex.ru

ГРУБОВ В.В.,

к. ф.-м. н., АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис, Россия, e-mail: vgrubov@gmail.com

МАКСИМЕНКО В.А.,

д. ф.-м. н., АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис, Россия, e-mail: maximenkovl@gmail.com

УТЯШЕВ Н.П.,

ФГБУ «Национальный медико-хирургический Центр им. Н. И. Пирогова», г. Москва, Россия,
e-mail: utyashevnp@pirogov-center.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ВРАЧА ЭПИЛЕПТОЛОГА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА ПРИСТУПОВ ЭПИЛЕПСИИ

DOI: 1025881/18110193_2021_3_62

Аннотация.

Данная статья направлена на разработку системы в помощь врачу-эпилептологу для автоматизированного поиска приступов эпилепсии на электроэнцефалографических записях.

Цель исследования: разработка программного обеспечения, реализующего анализ сигналов ЭЭГ для последующего детектирования эпилептических приступов.

Материалы и методы: в работе были использованы данные ЭЭГ 10 пациентов с симптоматической эпилепсией, для которой характерны повторяющиеся, стереотипные припадки после воздействия на мозг провоцирующего фактора. Данные регистрировались для 25 каналов ЭЭГ с дополнительными каналами для записи кардиоактивности и служебных маркеров. Частота дискретизации сигналов ЭЭГ составляла 128 Гц. Для получения необходимых характеристик обработка записи основана на вейвлет-преобразовании.

Результаты: было разработано программное обеспечение, результатом работы которого является дискретная разметка, которая показывает, в каких минутных фрагментах ЭЭГ возможно появление приступов эпилепсии.

Выводы: сформулированы дальнейшие направления модификации программного обеспечения для повышения его эффективности и удобства пользования.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, автоматическое распознавание эпилептической активности, вейвлет-анализ сигнала ЭЭГ, автоматизированное рабочее место врача-эпилептолога, система поддержки принятия врачебных решений.

Для цитирования: Кучин А.С., Грубов В.В., Максименко В.А., Утяшев Н.П. Автоматизированное рабочее место врача эпилептолога с возможностью автоматического поиска приступов эпилепсии. Врач и информационные технологии. 2021; 3: 62-73. doi: 1025881/18110193_2021_3_62.

KUCHIN A.S.,

RUDN University, Moscow, Russia, e-mail: alex.ku4in@yandex.ru

GRUBOV V.V.,

PhD, Innopolis University, Innopolis, Russia, e-mail: vgrubov@gmail.com

MAXIMENKO V.A.,

DSc, Innopolis University, Innopolis, Russia, e-mail: maximenkovl@gmail.com

UTYASHEV N.P.,

National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia,
e-mail: utyashevnp@pirogov-center.ru

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM FOR SEARCHING FOR EPILEPTIC SEIZURES

DOI: 1025881/18110193_2021_3_62

Abstract.

This article focuses on the development of a system to help epileptologists use an automated search for epileptic seizures in electroencephalographic records.

Purpose: Development of software that implements the analysis of EEG signals for the subsequent detection of epileptic seizures

Materials and methods: EEG data from 10 patients with symptomatic epilepsy, which are characterized by recurrent, stereotyped seizures after exposure to a provoking factor were used in the study. The data was recorded by 25 EEG channels with additional channels for recording cardioactivity and service markers. The sampling rate of EEG signals was 128 Hz. To obtain the required characteristics, the recording processing was based on the wavelet transform.

Results: The software was developed, the result of which is a discrete marking, which shows in which minute fragments of the EEG the appearance of epileptic seizures is possible. Findings: Further directions of software modification to improve its efficiency and usability have been formulated.

Keywords: *electroencephalogram, automatic recognition of epileptic activity, wavelet analysis of the EEG signal, automated workstation of an epileptologist, medical decision support system.*

How to cite: *Kuchin A.S., Grubov V.V., Maximenko V.A., Utyashev N.P. Software implementation of the algorithm for searching for epilepsy seizures. Medical doctor and information technology. 2021; 3: 62-73. (In Russ.). doi: 1025881/18110193_2021_3_62.*

ВВЕДЕНИЕ

Эпилепсия — хроническое заболевание, проявляющееся повторными судорожными или другими припадками, не спровоцированными какими-либо немедленно определяемыми причинами и сопровождающееся изменениями личности. Эпилептический припадок — клиническое проявление аномального и избыточно-го разряда группы нейронов головного мозга. [1] По данным мировой статистики эпилепсия входит в число наиболее распространенных и опасных заболеваний. Анализ общей заболеваемости показал, что в развитых странах, исключая фебрильные судороги и единичные приступы, выявляется около 50 случаев эпилепсии на 100000 населения в год [2]. Количество больных эпилепсией в мире насчитывает около 30 миллионов человек. Из них в Европе — 3 млн, в США — 4 млн, в России — 500 тыс. человек. Ежегодно в России эпилепсией заболевают 54 тыс. человек [3].

Одним из методов диагностики заболевания является электроэнцефалография, неинвазивный метод исследования функционального состояния головного мозга путём регистрации его биоэлектрической активности. Регистрация электроэнцефалограмм (ЭЭГ) осуществляется при помощи неинвазивных электродов, закрепленных на голове в соответствии с международной системой “10 — 10%” или “10 — 20%”. Каждый электрод подключается к электроэнцефалографу, который усиливает сигнал ЭЭГ и передает его в компьютер. Вместе с ЭЭГ осуществляется видеомониторинг для более точного определения приступа и других состояний пациента. В результате электроэнцефалографического обследования формируется массив данных электрической активности головного мозга. При помощи специальных программ врач-эпилептолог может обрабатывать сигналы, осуществлять поиск биомаркеров заболевания и делать заключения.

Биомаркером эпилепсии выступает эпилептический приступ, характеризующийся высокоамплитудной ритмической активностью на ЭЭГ. Из-за редкости появления приступов прибегают к методам их искусственного возбуждения, среди которых известны гипервентиляция и ритмическая фотостимуляция [4]. Гипервентиляция — это частое и глубокое дыхание в течение 1–3 минут. Она позволяет выявить скрытые эпилептические

изменения и уточнить характер эпилептических приступов. Фотостимуляция основана на том, что световые мигания у пациентов с эпилепсией могут вызывать приступы. Однако, для того чтобы зарегистрировать приступ эпилепсии может потребоваться несколько процедур фотостимуляции и гипервентиляции. В результате длительность записанных сигналов ЭЭГ варьирует от нескольких часов до нескольких суток.

В области исследования эпилепсии одним из наиболее популярных направлений является автоматизированный поиск приступов эпилепсии и разработка соответствующих алгоритмов, в том числе с использованием машинного обучения. Например, в статье [5] ученые создают систему автоматического распознавания информации, которую сигналы ЭЭГ могут содержать для работы мозга. В статье [6] исследователи разработали методы автоматического обнаружения спайков и припадков. Статья [7] описывает использование метода, который сочетает в себе функции ручной работы и кодирование автоэнкодера нейронной сети для достижения высокой производительности при обнаружении припадков в сигналах ЭЭГ. Использование одномерной глубокой нейронной сети для надежного обнаружения приступов, которая позволит ускорить обработку записей ЭЭГ, для диагностики и автоматического распознавания эпилептических припадков предлагается в статье [8].

Основными проблемами в данном направлении являются переобучение и большой объём требуемых вычислений. У каждого испытуемого имеются индивидуальные особенности активности головного мозга, поэтому сложно создать базу данных, в которой все эти особенности представлены достаточно полно. В этом проблема использования алгоритма с учителем, с другой стороны, алгоритму без учителя такая база не нужна, поэтому в нашей работе пробуем реализовать именно его. Для решения второй проблемы мы разработаем алгоритм, время работы и объём вычислений которого, значительно ниже, чем в представленных ранее методах.

Анализ полученных ЭЭГ занимает продолжительное время, так как врачу требуется просмотреть всю запись от начала до конца, выделить приступы, сопоставить их с видео. Анализ усложняется наличием артефактов на записях ЭЭГ, связанных с электрическими помехами,

двигательной активностью. В итоге обработка 3-х дневной записи ЭЭГ занимает у врача около 3-х дней монотонной работы, при которой возможны ошибки, вызванные усталостью. Из-за медленной обработки сигналов растет время постановки диагноза и возникает риск неоперативного хирургического вмешательства.

Указанные проблемы могут быть решены за счет использования интеллектуальных ассистирующих технологий — программных средств, осуществляющих анализ сигналов ЭЭГ и предоставляющих врачу быструю навигацию по фрагментам ЭЭГ, содержащим потенциальные электроэнцефалографические биомаркеры заболевания. Данные технологии помогут сократить время постановки диагноза, а также помочь оперативно отправлять пациентов на лечение.

Целью исследования является разработка программного обеспечения, реализующего анализ сигналов ЭЭГ для последующего детектирования эпилептических приступов. Разрабатываемое программное обеспечение позволит снизить время обработки ЭЭГ, а также риск постановки ложного диагноза.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были использованы данные ЭЭГ 10 пациентов с симптоматической эпилепсией, для которой характерны повторяющиеся, стереотипные припадки после воздействия на мозг провоцирующего фактора. Возраст пациентов составлял 21–53 года, соотношение мужчин и женщин — 6/4. Пациенты с объемными образованиями головного мозга были исключены из исследования, из-за возможного влияния на когнитивную и эмоциональную сферу [9].

Для пациентов проводился непрерывный 24-часовой мониторинг ЭЭГ и видео во время сна и бодрствования. Данная процедура является стандартной в медицинской практике и направлена на регистрацию эпилептической активности и верификацию эпилептогенных зон для дальнейшего клинического лечения. Все медицинские процедуры проводились в Лаборатории диагностики и лечения эпилепсии Национального медико-хирургического Центра имени Н.И. Пирогова (Москва, Россия). Все исследования проводились в соответствии с Хельсинкской декларацией и были одобрены локальным этическим комитетом. Во время мониторинга

пациенты придерживались своего обычного распорядка дня, в который было включено проведение стандартных для медицинского исследования физиологических проб (фотостимуляции, гипервентиляции и т.д.).

Данные регистрировались для 25 каналов ЭЭГ с дополнительными каналами для записи кардиоактивности и служебных маркеров. Частота дискретизации сигналов ЭЭГ составляла 128 Гц. В качестве предварительной обработки к данным ЭЭГ были применены базовые фильтры: полосовой 1–60 Гц — чтобы убрать НЧ и ВЧ помехи и режекторный 50 Гц — чтобы убрать наводку 50 Гц от электросети. Пример анализируемой записи ЭЭГ представлен на Рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанный метод автоматизированного поиска приступов эпилепсии основан на применении вейвлетного преобразования полученных сигналов ЭЭГ. Вейвлет преобразование сигнала — это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных из материнского вейвлета, обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во времени и изменения временного масштаба [10]. Для первичного исследования сигналов ЭЭГ было использовано непрерывное вейвлетное преобразование (НВП) [11], которое, применительно к рассматриваемой задаче, представляет собой свертку исследуемого сигнала ЭЭГ $x(t)$ и набора базисных функций $\psi_{s,\tau}$ [11]:

$$W(s, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt, \quad \psi_{s,\tau}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_0\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (1)$$

где: s — временной масштаб, определяющий растяжение или сжатие материнской функции, τ — временной сдвиг вейвлетного преобразования, $\psi_0(\eta)$ — материнский вейвлет. В данной работе был использован материнский морле-вейвлет [11].

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{\eta^2}{2}} \quad (2)$$

Для исследуемого ряда ЭЭГ выполнялось НВП и рассчитывались усредненные по характерному частотному F_s диапазону значения энергии $W(t)$ [12]:

$$W(s, \tau) = \int_{F_s}^{\dots} |W(f_s, t)|^2 df_s \quad (3)$$

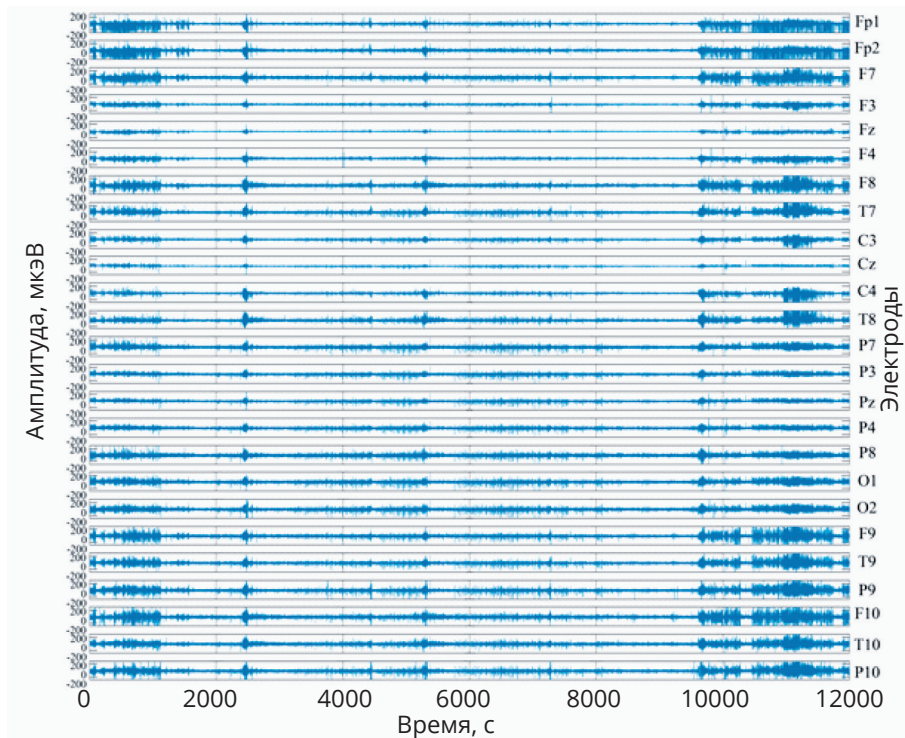


Рисунок. 1 — Исходная запись электроэнцефалограммы для проведения проверки работы программы.

Из-за большого количества информации, а следовательно, большого количества используемых ресурсов, было принято решение обрабатывать не весь файл целиком, а использовать обработку каждой минуты файла (см. Рис. 2) с последующей записью основных характеристик данного участка.

В качестве основных характеристик были выбраны усреднённые по времени значения энергии в диапазоне 2–5 Гц и 5–30 Гц. Для получения необходимых характеристик обработка записи начинается с построения вейвлет-поверхностей для всех каналов ЭЭГ. На Рис. 3 в качестве примера показана вейвлет-поверхность для минутного фрагмента электрода С3.

После расчета необходимо усреднить вейвлет-энергию по времени для каждого из этих каналов.

$$W_c = \frac{\sum_0^n W}{n} \quad (4)$$

где: n — количество значений вейвлет-энергии.

Распределение такой усредненной энергии для одного минутного интервала приведено на Рис. 4.

После проведённых действий далее происходит усреднение вейвлет-энергии по всем каналам, которое считается по формуле:

$$W_e = \frac{\sum_0^k W_c}{k} \quad (5)$$

где: k — количество электродов, w — вейвлет-энергия.

По итогу обработки одной минуты получается массив значений—зависимость вейвлет-энергии от частоты, что положительно сказывается на количестве затрачиваемого времени ресурсов. Такое же повторяется для всей записи и в итоге получается поверхность, образуемая характеристиками обработки данного участка. На Рис. 5 показано общее распределение вейвлет-энергии, усредненной по минутным временным фрагментам и всем каналам ЭЭГ.

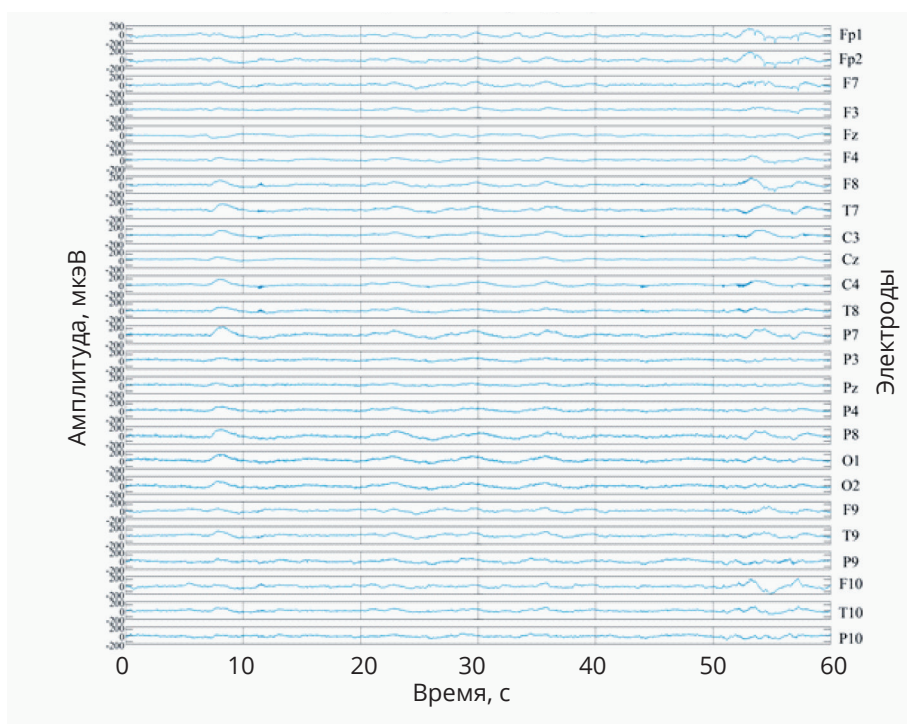


Рисунок. 2 — График одной минуты записи ЭЭГ.

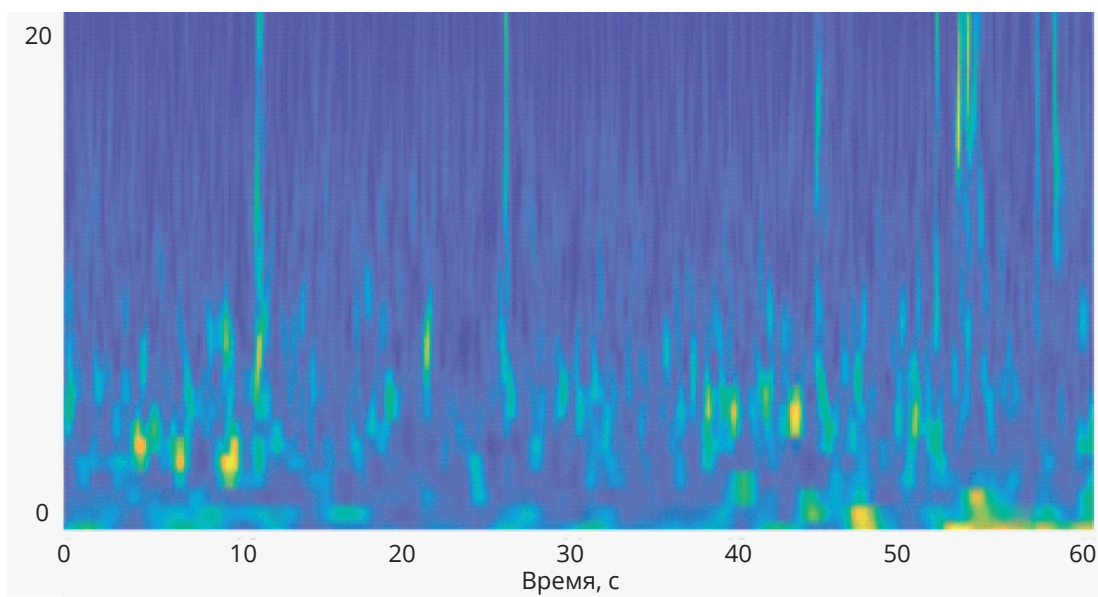


Рисунок. 3 — Вейвлет-поверхность для канала С3.

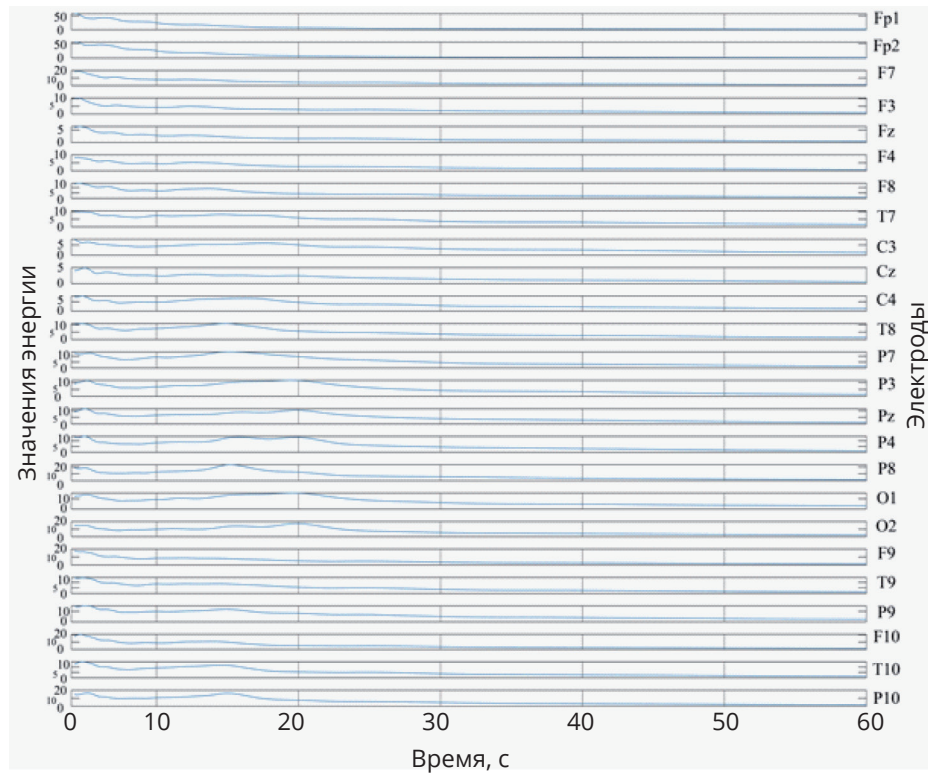


Рисунок. 4 — Усредненная по времени вейвлет-энергия.

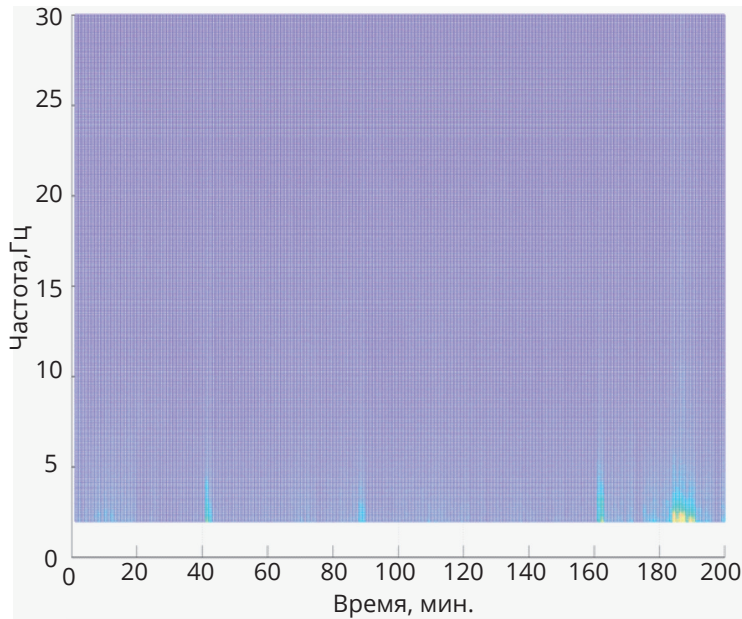


Рисунок. 5 — Общее распределение вейвлет-энергии, усредненной по минутным временным фрагментам и всем каналам ЭЭГ.

Для следующего шага нам необходимо найти медианные значения энергии в диапазонах: 2–5 Гц и 5–30 Гц. Для каждого минутного участка находятся собственные значения энергии. На Рис. 6 приведены распределения такой усредненной энергии.

В конце необходимо найти отношения этих энергий по формуле:

$$E = \frac{E_{2-5 \text{ Hz}}}{E_{5-30 \text{ Hz}}}$$

а также найти локальные максимумы выражения (см. Рис. 7).

Далее в работу включается алгоритм опорных векторов. Алгоритм опорных векторов — набор схожих алгоритмов обучения с учителем, использующихся для задач классификации и регрессионного анализа. Принадлежит к семейству линейных классификаторов, может также рассматриваться как специальный случай регуляризации по Тихонову. Особым свойством метода опорных векторов является непрерывное уменьшение эмпирической ошибки

классификации и увеличение зазора, поэтому метод также известен как метод классификатора с максимальным зазором.

Основная идея метода — перевод исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором в этом пространстве. Две параллельных гиперплоскости строятся по обеим сторонам гиперплоскости, разделяющей наши классы. Разделяющей гиперплоскостью будет гиперплоскость, максимизирующая расстояние до двух параллельных гиперплоскостей. Алгоритм работает в предположении, что чем больше разница или расстояние между этими параллельными гиперплоскостями, тем меньше будет средняя ошибка классификатора [13]. Результат работы метода представлен на рисунке 8.

Результатом работы программы является дискретная разметка, которая показывает, в каких минутных фрагментах ЭЭГ возможно появление приступов эпилепсии. Сортировка составлена таким образом, чтобы врач первым

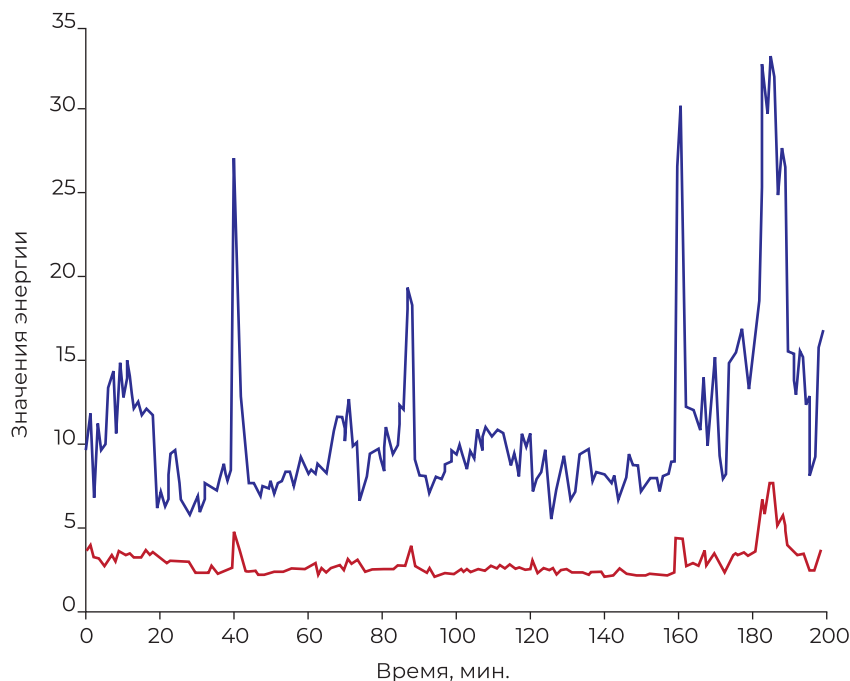


Рисунок. 6 — Значения усредненной вейвлет-энергии.
 На графике: синим — диапазон 2–5 Гц; оранжевым — 5–30 Гц.

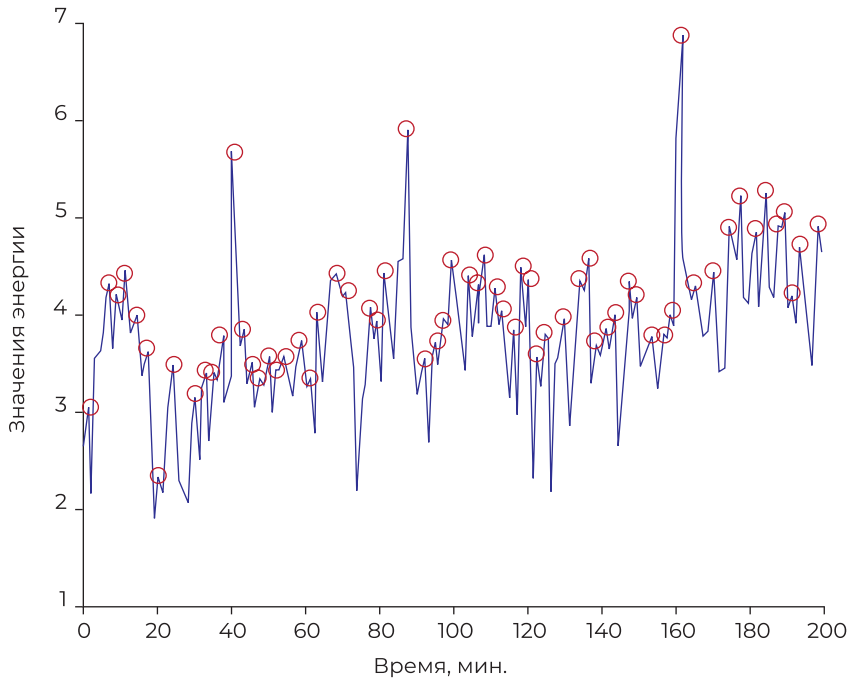


Рисунок. 7 — Отношение энергий и локальные максимумы.

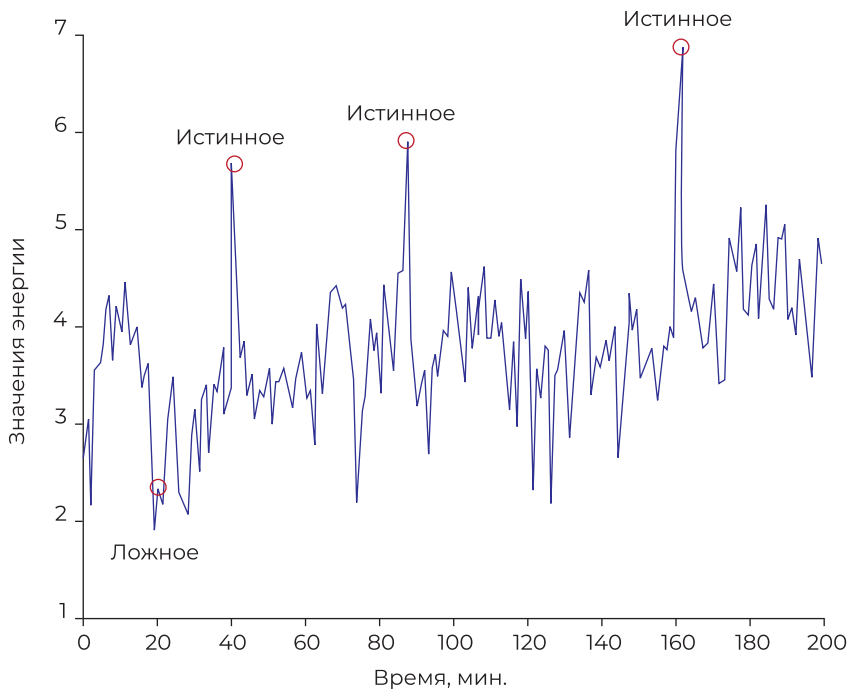


Рисунок. 8 — Результат работы алгоритма опорных векторов.

делом смотрел те моменты, где программа считает вероятность приступа более высокой. Видно, что для тестового пациента разметка, созданная алгоритмом, оказалась очень точной, в сравнении с уже размеченной записью. У тестового пациента было три приступа на моментах времени: 40, 87, 161. Программой было обнаружено три приступа и допущена ошибка в одном случае.

Для написания программы была использована среда программирования Microsoft Visual Studio 2019 Community. Язык C Sharp — простой, современный, объектно-ориентированный, обеспечивающий безопасность типов язык программирования. C Sharp происходит из семейства языков C [14].

ОБСУЖДЕНИЕ

Главной особенностью разработанного приложения является то, что искусственный интеллект в данной программе осуществляет ассистирующую функцию. Принятие решения о том, является ли выделенный программой отрезок приступов эпилепсии — остаётся за врачом. Это существенно ускоряет процесс обработки данных. С другой стороны, конечное решение принимает квалифицированный человек — это важно для медицины, где решения, от которых зависит жизнь и здоровье человека не должны приниматься ИИ, по крайней мере на данном этапе развития технологий.

Согласно приведённым результатам разработанный алгоритм поиска эпилептических приступов демонстрирует высокую точность на тестовых данных. Для трех истинных приступов эпилепсии программой был обнаружен один ложный. Для достоверной оценки точности и анализа устойчивости эффективности алгоритма относительно вариабельности данных разных пациентов и особенностей регистрирующего оборудования планируется проведение дальнейших исследований. На данном этапе для повышения эффективности и удобства пользования запланированы следующие улучшения программного обеспечения:

1. Расширение поддерживаемых типов данных.

На данном этапе программа воспринимает текстовые файлы. Сложность в организации

импорта большого количества типов файлов состоит в отсутствии строгой классификации по шифровке файлов. Обычно производители электроэнцефалографов подстраивают тип данных под свой продукт. Из-за этого возникает огромное количество разных типов данных, направленных на регистрацию сигналов ЭЭГ, и их количество постоянно увеличивается. Из наиболее используемых форматов выделяют форматы EDF и EDF+.

2. Фильтрация сигналов.

Существует несколько типов фильтров: Фильтр низких частот, Фильтр верхних частот и Полосовой фильтр. Фильтрация представляет собой одну из самых распространенных операций обработки сигналов. Цель фильтрации состоит в подавлении помех, содержащихся в сигнале, или в выделении отдельных составляющих сигнала, соответствующих тем или иным свойствам исследуемого процесса [16].

3. Добавление возможности по обнаружению, удалению и выделению артефактов.

Артефакты, получаемые в ходе проведения электроэнцефалографического исследования, представляют собой дефект записи [17]. По своей природе артефакты бывают физиологические и технические. К физиологическим относятся такие артефакты: наложение кардиограммы, движение глаз, сокращения мышц, движения головы, глотательные движения и т.д. К техническим артефактам относят сетевую наводку частотой 50 Гц, возникающую вследствие наличия электромагнитных полей, генерируемых электрической сетью в помещении, а также артефакты, связанные с качанием проводов и плохо закрепленных электродов [18].

ВЫВОДЫ

По результатам исследования разработано программное обеспечение, направленное на помощь врачу-эпилептологу в обработке длинных (суточных) записей электроэнцефалограмм. Продемонстрирована высокая точность автоматического поиска эпилептических приступов на тестовых записях. Сформулированы дальнейшие направления модификации программного обеспечения для повышения его

эффективности и удобства пользования. Уже сейчас разработанное программное обеспечение может перейти в фазу тестирования для

набора статистических данных и повышения эффективности обучения алгоритмов искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Гусев Е. И., Коновалов А. Н., Скворцова В. И., Неврология и нейрохирургия / Ред. А. В. Козлова, А. Н. Коновалова. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. 624 с. [Gusev EI, Konovalov AN, Skvortsova VI. Neurology and neurosurgery. A.V. Kozlova, A.N. Konovalova, editors. M: GEOTAR-Media, 2009. 624 p. (In Russ).]
2. Сидоренко К. В., Даренская Е. Ю., Распространенность эпилепсии в мире [Электронный ресурс]. 2014; 6: 128-130. Доступно по: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=33829>. Ссылка действительна на 04.10.2021. [Sidorenko KV, Darenskaya EYu. The prevalence of epilepsy in the world [Electronic resource]. 2014; 6: 128-130. Available at: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=33829>. Accessed 04.10.2021. (In Russ).]
3. Можаяев С.В., Скоромец А.А., Скоромец Т.А. Нейрохирургия. — СПб.: Политехника, 2001. 355 с. [Mozhaev SV, Skoromets AA, Skoromets TA. Neurosurgery. SPb.: Polytechnic, 2001. 355 p. (In Russ).]
4. Колягин В. В., Эпилепсия. — Иркутск: РИО ГБОУ ДПО ИГМАПО, 2013. 232 с. [Kolyagin VV. Epilepsy. Irkutsk: RIO GBOU DPO IGMAPO, 2013. 232 p. (In Russ).]
5. Kraik A, He U, Conteras-Vidal J. Deep Learning for EEG Classification Problems. Journal of Neural Engineering. 2019; 16: 1-38.
6. Gotman J. Automatic detection of seizures and spikes. Journal of Clinical Neurophysiology. 1999; 16: 130-140.
7. Shoebi A, Gassemi N, Alizadehsani R, Rouhani M, Hosseini-Nejad H, Khosravi A, et al. Comprehensive comparison of created functions and convolutional autoencoders for detecting epileptic seizures from EEG signals. Expert systems. 2021; 18: 1-32.
8. Wei Z, Wenbing Z, Wenfeng V, Xiaolu J, Xiaodong Z, Yonghong P, Baokan Z, Guokai Z. New neural network for detecting seizures on EEG signals. Computational and mathematical methods in medicine. 2020; 2020: 1-9 p.
9. Hejlsberg A, Torgersen M, Viltamut S, Gold P, The C # Programming Language. Classics of Computers Science. SPb.: Peter, 2012.784 p.
10. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 104 с. [Yakovlev AN. Introduction to wavelet transformations. Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2003.104 p. (In Russ).]
11. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и приложения. — М.: Физматлит, 2003. 176 с. [Koronovskii AA, Hramov AE. Continuous wavelet analysis and applications. Moscow: Fizmatlit, 2003. 176 p. (In Russ).]
12. Sitnikova EYu, Khramov AE, Grubov VV, Koronovskiy AA. Time-frequency characteristics and dynamics of dreams in WAG / Rij rats with absence epilepsy. Brain Research. 2014; 1543: 290-299.
13. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. — М.: МЦНМО, 2013. 390 с. [Vyugin VV. Mathematical foundations of the theory of machine learning and forecasting. M.: MTSNMO, 2013. 390 p. (In Russ).]
14. Белоусов Ю.Б., Белоусов Д.Ю., Чикина Е.С., Григорьев В.Ю., Медников О.И., Бекетов А.С. Исследование медико-социальных проблем эпилепсии в России. Специальный выпуск. 2004; 4: 2-90. [Belousov YuB, Belousov DYu, Chikina ES, Grigoriev VYu, Mednikov OI, Beketov AS. Research of medical and social problems of epilepsy in Russia. Special issue. 2004; 4: 2-90. (In Russ).]

15. Sadlair LG, Sheffer IE, Smith S, Carstensen B, Farrell K, Connolly MB. Features of absence EEG in idiopathic generalized epilepsy: the effect of syndrome, age and condition. *Epilepsy*. 2009; 50(6): 1572-1578.
16. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. 192 с. [Gutnikov VS. Filtration of measuring signals. L.: Energoatomizdat., 1990. 192 p. (In Russ).]
17. Гуляев С.А., Архипенко И.В. Артефакты при электроэнцефалографическом исследовании: выявление и дифференциальный диагноз // Русский журнал детской неврологии. — 2012. — №7. — С.3-16. [Gulyaev SA, Archipenko IV. Artifacts in electroencephalographic examination: identification and differential diagnosis. *Russian Journal of Child Neurology*. 2012; 7: 3-16. (In Russ).]
18. Звёздочкина Н.В. Исследование электрической активности головного мозга. — Казань: Казанский университет, 2014. 59 с. [Zvezdochkina NV. Study of the electrical activity of the brain. Kazan: Kazan University, 2014. 59 p. (In Russ).]